

光注入和光电反馈联合作用下垂直腔表面发射激光器的动力学特性研究*

曹体 林晓东 夏光琼 陈兴华 吴正茂†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2011年8月15日收到; 2011年9月8日收到修改稿)

基于自旋反转模型, 研究了垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 在光注入和光电反馈共同作用下的动力学特性. 研究表明: 一个受到主 VCSEL 光注入的副 VCSEL, 在同时存在光电正反馈时, 其输出的两个线偏振模式 (X 和 Y 偏振模) 可呈现周期、倍周期、多周期、混沌等丰富的动力学状态, 且两偏振模动力学态的演化路径存在差异. 各动力学状态在由反馈强度 f 与注入强度 η 所构成的参数空间的分布区域随着主、副 VCSEL 的频率失谐 $\Delta\nu$ ($\Delta\nu = \nu_m - \nu_s$, ν_m, ν_s 分别为主、副 VCSEL 自由运行时的振荡频率) 的变化而发生改变. 当 $\Delta\nu$ 为正失谐时, 呈现混沌的区域相比零失谐和负失谐时有明显的扩展, 即副 VCSEL 能在更大的参数范围内实现混沌输出. 对于特定的频率失谐, 分析了光电正反馈强度 f 和光注入强度 η 对混沌输出带宽的影响. 通过合理选择反馈强度以及注入强度, 可使副 VCSEL 混沌输出带宽显著增加.

关键词: 垂直腔表面发射激光器, 光电正反馈, 光注入, 混沌带宽

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

1 引言

半导体激光器在光注入^[1-3]、光反馈^[4-6]和光电反馈^[7-9]等外部扰动下, 其输出具有丰富的非线性动力学状态, 并可经历不同的路径达到混沌输出. 由于这些非线性动力学状态在混沌保密通信、激光雷达以及微波光子学等领域中具有广泛的应用价值^[10-12], 因此人们对外部扰动下的半导体激光器的动力学特性进行了大量研究. 早期的研究着重于半导体激光器在单个外部扰动下的非线性动力学特性, 但随着研究的深入, 人们发现, 与单一扰动系统相比, 包含多个扰动系统不仅具有更好的可调控能力, 同时可以实现单一扰动时无法实现的一些特殊应用需求. 因此, 最近几年该领域的研究重心逐渐转移到半导体激光器在两个或者两个以上扰动作用下的动力学特性^[13-19]. 文献[13]研究了半导体激光器在光电负反馈以及光注入共同

作用下的非线性动力学特性, 阐明了系统通往混沌的两条路径, 并分析了光注入的引入对混沌信号带宽的影响. 文献[14]研究了非相干光反馈半导体激光器在进一步受到光注入作用时, 系统输出状态的两条不同演化路径. 文献[15]实验研究了半导体激光器在两个反馈光的作用下, 系统输出混沌态的功率谱特性. 文献[16]研究了双光注入半导体激光器系统的非线性动力学行为, 并获得了三个具有不同特征的动力学区域. 文献[17-19]讨论了引入外光注入对光反馈半导体激光器的混沌带宽的影响. 已有的研究表明: 在多个扰动下的半导体激光器系统具有更加丰富、更加复杂的动力学行为, 通过控制多个扰动参量, 可以改善系统输出特性, 具有更加广阔的应用前景.

目前, 对多个外部扰动下半导体激光器动力学行为的研究大多局限于常规的边发射半导体激光器 (EEL), 而针对近年来蓬勃发展的垂直腔表面发射激光器 (VCSEL), 这方面的研究还非常缺乏. 由

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 61178011)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2011jjA40035, CSTC2012jjB40011) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: XDJK2010C019, XDJK2009B010) 资助的课题.

† E-mail: zmwu@swu.edu.cn

于 VCSEL 具有低阈值电流、大调制带宽、容易与光纤耦合、易集成形成激光阵列、制作成本低廉等优势^[20-23], 将有望取代 EEL 而成为未来光通信和光信号处理的关键器件, 因此研究 VCSEL 在多个扰动下的非线性动力学特性具有重要的意义. 基于此, 本文利用自旋反转模型 (SFM), 数值分析了在光注入与光电正反馈共同作用下 VCSEL 的非线性动力学特性以及各动力学态的演化, 并讨论 VCSEL 处于混沌输出时, 注入强度与反馈强度对混沌带宽的影响.

2 理论模型

图 1 为光注入、光电正反馈下 VCSEL 的系统结构示意图. 主激光器 (M-VCSEL) 的中心波长可调, 其输出的光经光隔离器 (ISO)、反射镜 (M) 和中性密度衰减片 (NDF) 及分束镜 (BS1) 后注入到副激光器 (S-VCSEL) 中. S-VCSEL 的中心波长为 850 nm, 它发出的光经分束镜 BS2 后分为两部分, 一部分经光电探测器 (PD) 转成电信号后, 再经过放大器 (A) 和可变衰减器 (VA) 反馈回 S-VCSEL. 另一部分经 BS1 后直接进入测试系统. 其中, ISO 保证光的单向注入, NDF 和 VA 分别用于调节光注入强度和光电反馈强度. 图 1 中的实线表示光信号传输路径, 虚线表示电信号传输路径.

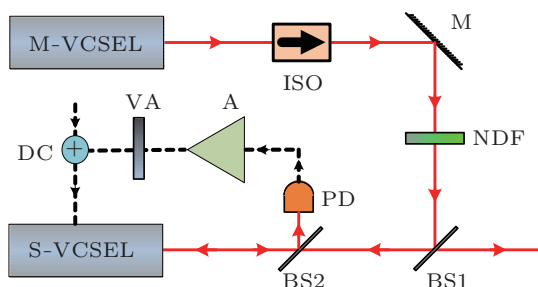


图 1 光注入和光电正反馈共同作用下 VCSEL 系统模型

根据 SFM^[20], 并考虑到光注入以及光电反馈的影响, 描述 M-VCSEL, S-VCSEL 工作特性的速率方程组为

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^m}{dt} &= k(1 + i\alpha)(N^m E_{x,y}^m - E_{x,y}^m \pm inE_{y,x}^m) \\ &\mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{x,y}^m, \quad (1) \\ \frac{dE_{x,y}^s}{dt} &= k(1 + i\alpha)(N^s E_{x,y}^s - E_{x,y}^s \pm inE_{y,x}^s) \\ &\mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{x,y}^s \end{aligned}$$

$$+ \eta E_{x,y}^m(t - \tau_c) e^{-i2\pi\nu^m\tau_c + i2\pi\Delta\nu t}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^m}{dt} &= -\gamma_e N^m(1 + P^m) + \gamma_e \mu \\ &- i\gamma_e n(E_y^m E_x^{m*} - E_x^m E_y^{m*}), \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^s}{dt} &= -\gamma_e N^s(1 + P^s) \\ &+ \gamma_e \mu \left[1 + f \frac{P^s(t - \tau)}{P_0^s} \right] \\ &- i\gamma_e n(E_y^s E_x^{s*} - E_x^s E_y^{s*}), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dn^{m,s}}{dt} &= -\gamma_s n - \gamma_e n P^{m,s} - i\gamma_e N^{m,s} \\ &\times (E_y^{m,s} E_x^{m,s*} - E_x^{m,s} E_y^{m,s*}), \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{x,y}^{m,s} &= |E_{x,y}^{m,s}|^2, \\ P^{m,s} &= P_x^{m,s} + P_y^{m,s}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中, 上标 m, s 分别代表主、副激光器, 下标 x, y 分别代表 X, Y 偏振模. E 表示光场的慢变振幅, N 为总的载流子密度, n 表示两个自旋反转载流子密度的差值, τ_c 表示从 M-VCSEL 到 S-VCSEL 的传输时间, k 为光场衰减率, α 为线宽增强因子, γ_e 为总的载流子衰减率, γ_s 为自旋反转速率, γ_a 代表线性色散效应, γ_p 代表有源介质线性双折射效应, τ 为 S-VCSEL 的反馈延迟时间, η 为注入系数, f 为反馈系数, μ 为以阈值电流进行归一化后的注入电流, P 为归一化的输出功率, P_0 为激光器自由运行时的输出功率, $\Delta\nu$ ($\Delta\nu = \nu_m - \nu_s$, ν_m, ν_s 分别为主、副激光器自由运行时的频率) 为两个激光器的频率失谐. 本文中为了简化问题, 忽略了随机噪声的影响, 并假定 M-VCSEL 与 S-VCSEL 的所有参数中除自由运行频率以外其余参数都相同.

3 结果与讨论

利用四阶 Runge-Kutta 方法对 (1)–(6) 式进行数值求解, 数值模拟中所用到的参数的取值如下^[22]: $\alpha = 3$, $\tau_c = 3$ ns, $\tau = 3$ ns, $k = 300$ ns⁻¹, $\gamma_e = 1$ ns⁻¹, $\gamma_s = 10$ ns⁻¹, $\gamma_a = 0.5$ ns⁻¹, $\gamma_p = 20$ ns⁻¹. 固定 S-VCSEL 自由运行频率 $\nu_s = 3.52941 \times 10^2$ THz (对应的中心波长为 850 nm), 通过改变 M-VCSEL 的自由运行频率 ν_m 即可得到不同的 $\Delta\nu$.

采用上述参数值, VCSEL 自由运行时输出功率随偏置电流变化的 P - μ 曲线如图 2 所示, 实线对应 X 偏振模, 点线对应 Y 偏振模. 从图 2 可以看出, 在电流刚刚超过阈值电流 $\mu = 1$ 后,

首先是 Y 偏振模开始激射, 随着电流的增加 Y 偏振模式的功率增加, 此时 X 偏振模式不激射. 当 $1.04 < \mu < 1.22$ 时, X 偏振模式的功率逐渐增加, Y 偏振模式的功率迅速减小直至被抑制. 继续增大注入电流, 当 $\mu > 1.22$ 后呈现 X 模和 Y 模共存输出状态. 在以下的讨论中, 选取 $\mu = 1.4$, 此时 VCSEL 两模共存, 其两模输出的时序图如图 3 所示, 可以看出, 两模均处于单周期态.

3.1 光注入与光电正反馈下 VCSEL 的非线性动力学特性

首先, 在无光注入的情况下, 光电正反馈下 S-VCSEL 输出功率极大值随光电反馈强度变化的分

岔图如图 4 所示. 图 4 可分 A 和 B 两个区域. 其中 A 区为两线性偏振模共存区域, B 区为只有 Y 偏振模激射的区域. 从图 4 可以看出, 随着反馈强度的增加, 激光器输出的两偏振模由单周期态过渡到多周期态, 然后进入混沌态. $f > 0.21$ 后, X 偏振模被抑制, 只存在 Y 偏振模激射. 这一现象与文献 [23] 报道的光电负反馈的情况不同, 这主要是由于激光器呈现的状态与自由运行时激光器的状态紧密相关, 加之光电正反馈等效于增加激光器的偏置电流, 而负反馈却等效于降低了偏置电流, 因此导致两种情形下的变化规律不一致. 在下面的讨论中, 只讨论 f 在 0—0.2 之间变化 (即 A 区) 时, S-VCSEL 输出两偏振模的动力学特性.

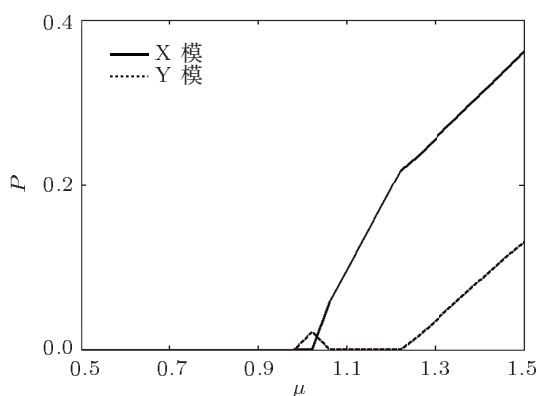


图 2 VCSEL 的 P - μ 曲线

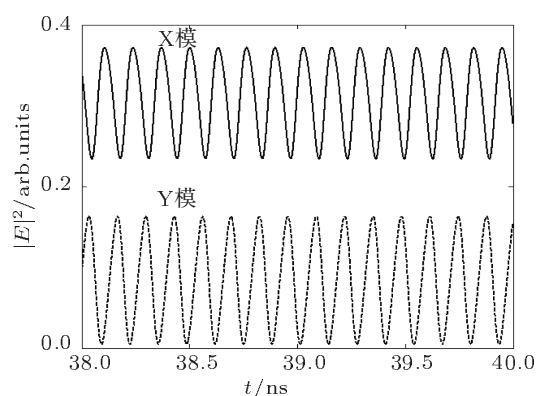


图 3 $\mu = 1.4$ 时, VCSEL 两模输出的时间序列

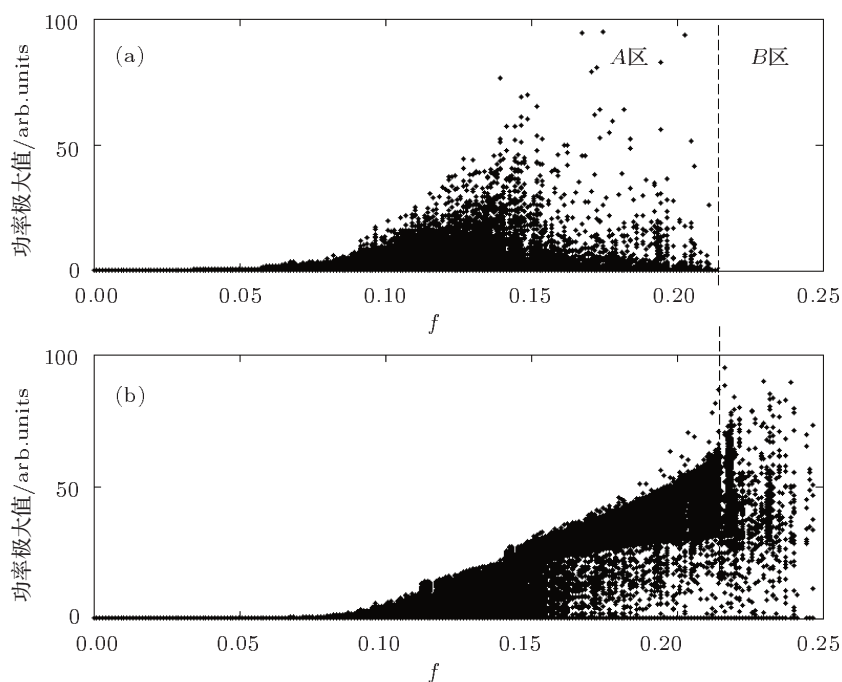


图 4 $\eta = 0$ 时, 光电正反馈下 S-VCSEL 输出功率极大值随反馈强度 f 变化的分岔图 (a) X 偏振模; (b) Y 偏振模

下面分析光注入对系统动力学状态的影响. 选取一固定的反馈系数 $f = 0.15$ (此时如没有光注入, 系统将呈现混沌态), 同时假定 M-VCSEL 与 S-VCSEL 的频率失谐 $\Delta\nu = 8.5$ GHz, 则 S-VCSEL 输出功率极大值随注入强度变化的分岔图如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 随着注入强度的增加, 两模的各动力学态演化大体相同, 但局部存在一些差异. 当注入强度较低 ($\eta < 117$ GHz) 时, S-VCSEL 输出的两偏振模均处于混沌 (CO) 态; $\eta = 117$ — 121 GHz 时, 两偏振模均处于准周期 (QP) 态. 随着 η 的进一步增加, 两偏振模的动力学态演化路径将出现差异, $\eta = 121$ — 131 GHz 时, X 偏振模处于二倍周期 (P2) 态, 而此时 Y 偏振模处于单周期 (P1) 态; $\eta = 131$ — 136 GHz 时, 两偏振模均处于 P1 态; $\eta = 136$ — 139 GHz 时, 两偏振模均处于 P2 态; $\eta = 139$ — 141 GHz 时, X 偏振模处于周期 3 (P3) 态, 而此时 Y 偏振模处于 QP 态; $\eta = 141$ — 180 GHz 时, 两偏振模均处于 CO 态; $\eta = 180$ — 189 GHz 时, X 偏振模处于 P2 态, 而此时 Y 偏振模处于 P1 态; $\eta = 189$ — 200 GHz 时, 两模均处于 P1 态. 为了更清晰地说明不同态的特征, 图 6 给出了一些典型状态的时间序列、功率谱及相图, 图 6(a)—(d) 是在注入强度 $\eta = 135, 138, 140$ 和 150 GHz 时得到的. 图 6 中左边 3 列对应 X 偏振模, 右边 3 列对应 Y 偏振模. 从图 6 可以看出, S-VCSEL 输出两偏振模的动力学态演化路径略有差异. 对于 X 偏振模, 随着注

入强度的增加, 其输出经历了 P1, P2, P3 进入 CO 态的路径; 而对于 Y 偏振模, 其动力学态演化的路径是 P1, P2, QP 再进入 CO 态.

图 7 给出了 $\Delta\nu$ 取不同值时, S-VCSEL 输出两偏振模的动力学状态在 (f, η) 参数空间的分布, 图中 PX 代表一些进入混沌态之前的过渡态, 如 P3, QP 等. 从图 7 可以看出, 在光注入与光电正反馈的共同作用下, 随着频率失谐的变化, S-VCSEL 输出两偏振模的动力学态范围也随之发生变化. 在无频率失谐 (即 $\Delta\nu = 0$) 时, (f, η) 参数空间中的 CO 区域比较小, 且主要存在于反馈较强的区域, 其余大部分为 P1 态以及很小区域的 P2 或 PX 态. 随着正频率失谐的增加, CO 态区域得到明显的扩展, 原来大范围的 P1 态被 CO 态所取代 (如图 7(a), (b) 所示). 此时, 注入强度 η 和反馈强度 f 在较大范围内变化时, S-VCSEL 输出两偏振模均可呈现 CO 态. 而随着频率负失谐的增加, S-VCSEL 输出的动力学区域也会有所变化, 但 CO 态区域的扩展没有正失谐时明显 (如图 7(d), (e) 所示).

3.2 注入强度与反馈强度对混沌带宽的影响

下面讨论 S-VCSEL 在光注入、光电正反馈下输出为混沌态时, 正反馈强度 f 和注入强度 η 对输出混沌带宽的影响. 此处, 定义包含整个功率谱全

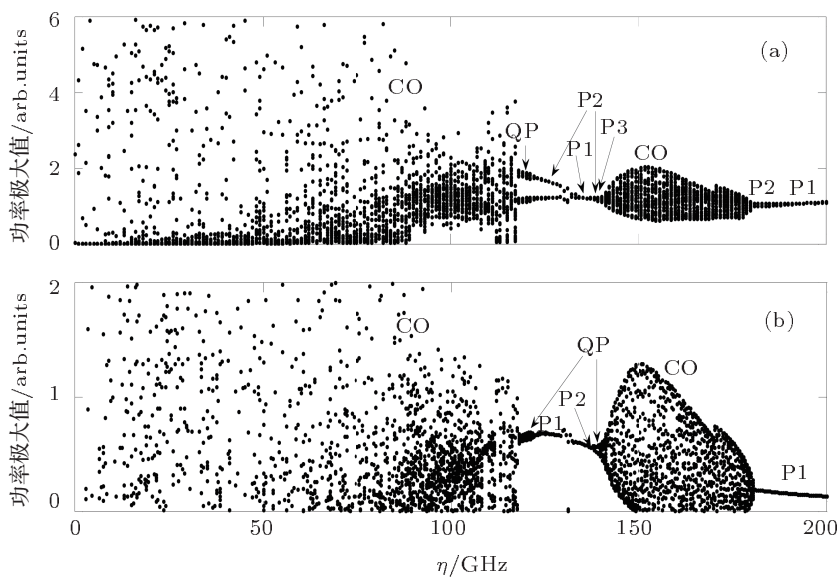


图 5 $\Delta\nu = 8.5$ GHz, $f = 0.15$ 时, S-VCSEL 输出功率极大值随注入强度变化的分岔图 (a) X 偏振模; (b) Y 偏振模

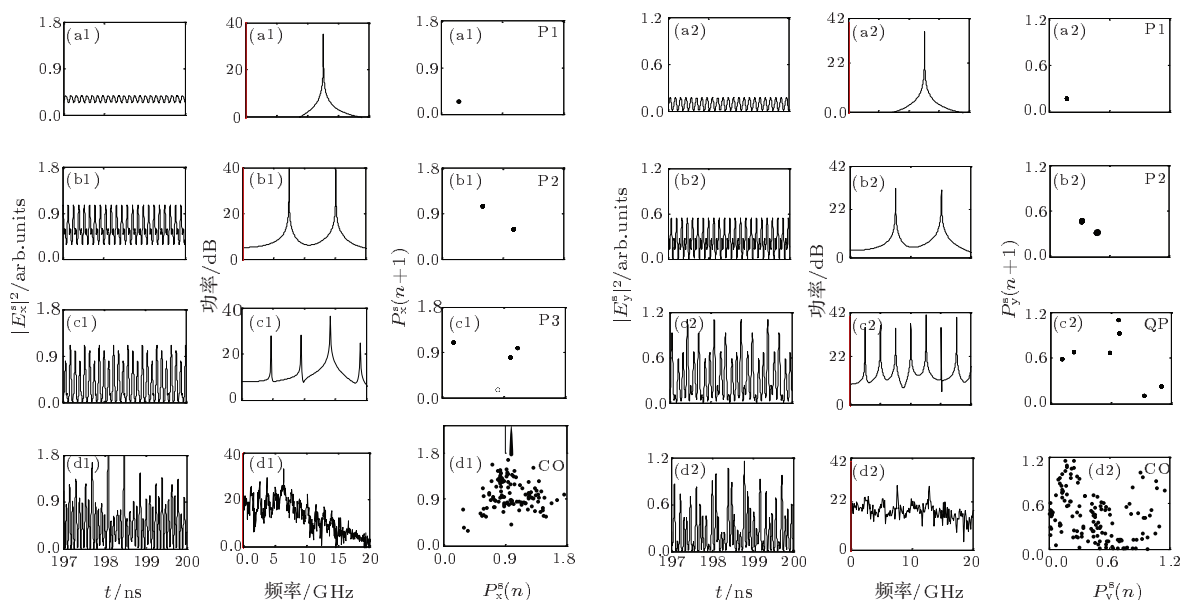


图 6 $\Delta\nu = 8.5$ GHz, $f = 0.15$ 时, 两偏振模的时间序列、功率谱和相图 (a1)—(d1) 为 X 偏振模; (a2)—(d2) 为 Y 偏振模; (a)—(d) 对应的注入强度 η 分别为 135, 138, 140 和 150 GHz

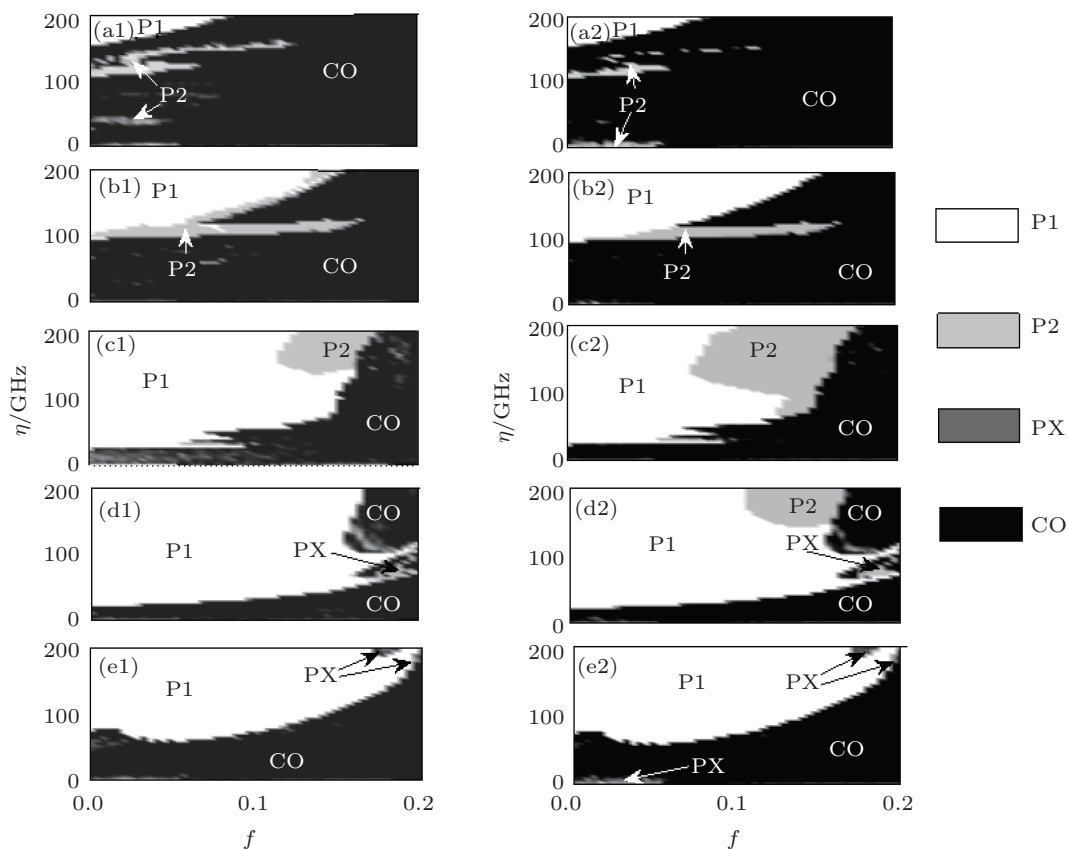


图 7 不同频率失谐 $\Delta\nu$ 时, S-VCSEL 输出两模动力学态在 (f, η) 参数空间的分布图 (a1)—(e1) 为 X 偏振模; (a2)—(e2) 为 Y 偏振模; (a)—(e) 对应 $\Delta\nu$ 分别为 20, 10, 0, -10 和 -20 GHz

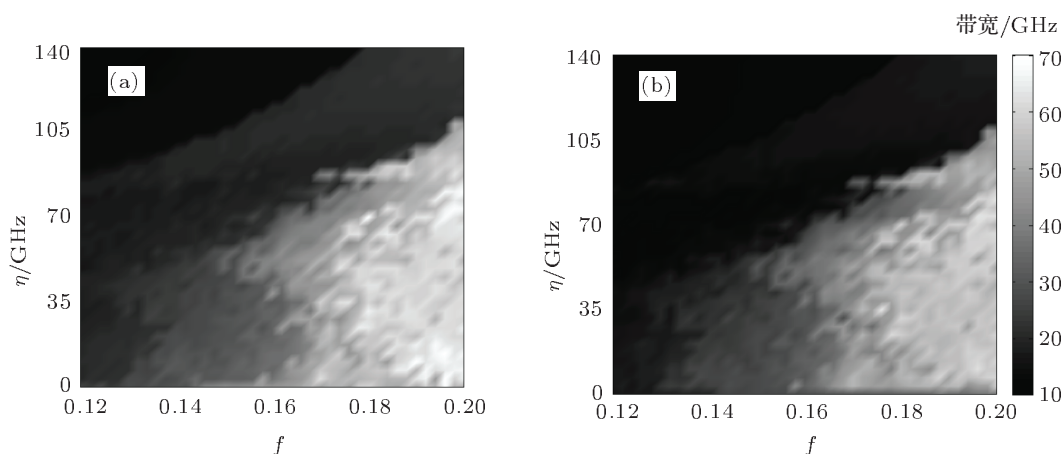


图8 $\Delta\nu = 20$ GHz 时, S-VCSEL 输出两模的混沌带宽随 f 和 η 的变化 (a) X 偏振模; (b) Y 偏振模

部能量 80% 的频率范围为混沌带宽^[13]. 图 8 给出了 $\Delta\nu = 20$ GHz 时, S-VCSEL 输出两模混沌带宽随 f 和 η 的变化, 图中利用灰度表征混沌带宽的大小. 从图 8 可以看出, S-VCSEL 输出两模混沌带宽随 η 和 f 的变化规律大体相同, 图 8 中相对明亮的区域对应的混沌带宽较大. 因此, 通过合理选择反馈强度以及注入强度, 可以使两偏振模同时获得较大的混沌带宽, 以实现高速率、双信道混沌保密通信.

4 结论

本文基于 SFM 模型, 对光注入与光电正反馈共同作用下 VCSEL 系统的非线性动力学特性进行了研究. 研究表明, 在光注入、光电正反馈

共同作用下, S-VCSEL 输出两模将呈现 P1 态、P2 态、P3 态、QP 态、CO 态等丰富的非线性动力学状态. 各动力学状态在 (f, η) 参数空间的分布范围与频率失谐的大小有关, 无频率失谐时, S-VCSEL 输出两模的 CO 态区域比较小, 主要存在于反馈较强、注入强度较弱的区域; 随着正失谐的增加, CO 态区域将得到明显的扩展; 对于负失谐, 其动力学态区域有变化, 但 CO 态区域的扩展没有正失谐时明显. 注入强度逐渐增加引起的 X, Y 偏振模的动力学态演化路径大体相同, 但局部存在差异. 另外, 通过优化系统参数, 可以使 S-VCSEL 的两个正交线偏振模式同时输出大带宽的混沌信号, 由于两个正交的线偏振模式可以作为两个不同的通信信道, 因此光注入与光电正反馈共同作用下 VCSEL 可作双信道高速混沌保密通信潜在的理想载波源.

- [1] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 3539
- [2] Xia G Q, Wu Z M, Yang Q, Lin X D 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 3643
- [3] Sacher J, Baums D, Panknin P, Elsässer W, Göbel E O 1992 *Phys. Rev. A* **45** 1893
- [4] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Deng T, Fan L, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [5] Liu H J, Feng J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘慧杰, 冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]
- [6] Yan S L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3810 (in Chinese) [颜森林 2010 物理学报 **59** 3810]
- [7] Turovets S I, Dellunde J, Shore K A 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 200
- [8] Xia G Q, Chan S C, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 572
- [9] Vicente R, Tang S, Mulet J, Mirasso C R, Liu J M 2004 *Phys. Rev. E* **70** 046216
- [10] Xia G Q, Wu Z M, Liao J F 2009 *Opt. Commun.* **282** 1009
- [11] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum. Electron.* **40** 815
- [12] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [13] Lin F Y, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173
- [14] Pin X X, Lin X D, Wu Z M, Wang L, Xia G Q 2010 *Optoelectron. Adv. Mat. Rap. Commun.* **4** 1095
- [15] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [16] Qi X Q, Liu J M 2011 *IEEE J. Quantum. Electron.* **47** 762
- [17] Takiguchi Y, Ohyagi K, Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 319
- [18] Lin X D, Xia G Q, Deng T, Chen J G, Wu Z M 2009 *Optoelectron. Adv. Mat. Rap. Commun.* **3** 1129
- [19] Wang A B, Wang Y C, He H C 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1633
- [20] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [21] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [22] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [23] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zuo X H, Wang M Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 7262

Dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser subject to optical injection and positive optoelectronic feedback*

Cao Ti Lin Xiao-Dong Xia Guang-Qiong Chen Xing-Hua Wu Zheng-Mao[†]

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 15 August 2011; revised manuscript received 8 September 2011)

Abstract

Based on the spin-flip model (SFM), we theoretically investigate the dynamics of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) subject to optical injection and positive optoelectronic feedback. The results show that under the joint action of positive optoelectronic feedback and optical injection from a master VCSEL (M-VCSEL), two polarization modes of a slave VCSEL (S-VCSEL) will show many dynamic states such as period one, period two, multi-period and chaos, and the evolution routes of these states are different for two polarization modes. Mapping of dynamic region as a function of feedback strength f and injection strength η is varied with frequency detuning between M-VCSEL and S-VCSEL $\Delta\nu$ ($\Delta\nu = \nu_m - \nu_s$, where ν_m and ν_s are the free-running frequencies of M-VCSEL and S-VCSEL, respectively). Compared with the case for zero or negative frequency detuning, the region of chaotic state is expanded significantly under positive $\Delta\nu$. For a fixed $\Delta\nu$, the influences of f and η on the chaotic bandwidth of S-VCSEL are discussed. Through selecting proper f and η , chaotic bandwidth of S-VCSEL can be improved obviously.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, positive optoelectronic feedback, optical injection, chaotic bandwidth

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011), the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant Nos. CSTC2011jjA40035, CSTC2012jjB40011), and the Special Fund for Basic Scientific Research in Central Universities, China (Grant Nos. XDJK2010C019, XDJK2009B010).

[†] E-mail: zmwu@swu.edu.cn